

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ВВ РАСХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

И. А. Спириц, А. А. Седов, А. А. Шалыгин, О. В. Шевлягин, В. Н. Князев, Д. А. Пронин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Исследование ударно-волновой чувствительности (УВЧ) взрывчатых веществ (ВВ) является одним из важнейших направлений в работе ВНИИЭФ. При конструировании боеприпасов в ряду важнейших характеристик заряда ВВ рассматривается его чувствительность к ударной волне (УВ) и режимы развития детонации. Особый интерес представляет изучение процесса формирования детонации при ударно-волновом инициировании расходящейся УВ, который в настоящее время мало изучен.

Для исследований УВЧ ВВ расходящейся УВ во ВНИИЭФ были разработаны метод блока контроля задержки (БКЗ) и метод порогового давления инициирования (ПДИ), которые являются развитием хорошо известного метода «Gap-test» [1].

БКЗ дает оценку УВЧ по времени задержки детонации ($\tau_{зад, мкс}$), ПДИ – по минимальному значению давления инициирующей ударной волны, при воздействии которой в исследуемом ВВ еще происходит развитие детонационного процесса. В основе этих методов заложено определение скорости развития взрывчатого превращения в ВВ путем регистрации моментов времени входа инициирующей УВ в пассивный заряд (ПЗ) и выхода детонационной волны из него с помощью системы электроконтактов.

Для получения более полного представления о процессах развития детонации в ВВ при инициировании их расходящейся УВ используемые методы исследования УВЧ ВВ (БКЗ и ПДИ) были дополнены радиоинтерферометрической методикой исследования быстропротекающих процессов (РИФ) [2, 3], которая, в отличие от применяемой в БКЗ и ПДИ электроконтактной методики, позволяет непрерывно регистрировать перемещения ударных и детонационных волн по исследуемому ВВ при отсутствии вносимых возмущений в регистрируемые процессы. Дополнение РИФ в методы БКЗ и ПДИ позволило также получить существенно больший объем информации по сравнению со штатной электроконтактной методикой.

Целью настоящей работы является исследование процессов возбуждения детонации ВВ при инициировании их расходящейся УВ с амплитудой в интервале от 2,7 ГПа до 19 ГПа с помощью методов БКЗ и ПДИ с РИФ.

Постановка опытов

Объектом исследований служили детали из ВВ на основе октогена (далее – октоген) и на основе триаминотринитробензола (смеси ТАТБ) с октогеном (далее – ТАТБ-октоген).

Эскиз экспериментальной сборки по исследованию возбуждения детонации ВВ расходящейся УВ представлена на рис. 1.

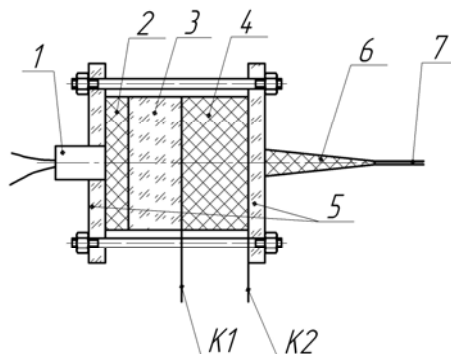


Рис. 1. Эскиз экспериментальной сборки: 1 – ЭД; 2 – активный заряд (АЗ) из ВВ на основе октогена; 3 – преграда из органического стекла; 4 – пассивный заряд (ПЗ) из исследуемого ВВ; 5 – основания из органического стекла; 6 – конический облучатель; 7 – диэлектрический волновод

В данной постановке опыта, рис. 1, детонация в исследуемых деталях 4 из ВВ $\varnothing 40 \times 20$ мм (БКЗ) или $\varnothing 60 \times 60$ мм (ПДИ) возбуждается расходящейся ударной волной, выходящей из преграды 3, изготовленной из оргстекла в форме диска $\varnothing 40$ мм (БКЗ) или $\varnothing 60$ мм (ПДИ) и генерируемой АЗ 2 из ВВ на основе октогена $\varnothing 40 \times 7,1$ мм (БКЗ) или $\varnothing 60 \times 30$ мм (ПДИ).

В опытах варьировалась толщина преграды 3 из оргстекла (L , мм), тем самым изменялась интенсивность инициирующей УВ.

С помощью двух электроконтактов (К1 и К2) регистрировали время от момента входа инициирующей ударной волны (ИУВ) в деталь 4 из исследуемого ВВ до момента выхода детонационной волны на ее противоположный торец.

Кроме регистрации времени прохождения УВ по детали 4 из ВВ с помощью электроконтактов все стадии процесса инициирования детонации в ПЗ регистрировали с помощью радиоинтерферометра

ПРИ-03, конический излучатель которого 6 примыкал к основанию 5, изготовленному из оргстекла.

Типичный пример экспериментальной интерферограммы, зарегистрированной радиоинтерферометром ПРИ-03 в одном из опытов с детонацией ПЗ, представлен на рис. 2.

Время задержки рассчитывали по формуле (1) как разность между экспериментально измеренным временем и временем, необходимым для прохождения стационарной детонационной волны всей длины ПЗ ($h_{ПЗ}$, мм):

$$\tau_{зад} = t_{дет} - h_{насс} / D \quad (1)$$

Глубину возбуждения детонации (H , мм) определяли по результатам обработки экспериментальных интерферограмм (рис. 2)

Давление инициирующей ударной волны, входящей в ПЗ, определяли путем решением задачи о распаде разрыва в Р-и координатах [4].

По сделанным оценкам, погрешность определения давления (P , ГПа) инициирующей УВ данным методом не превышает ~7 %.

Данные по результатам опыта приведены в табл. 1

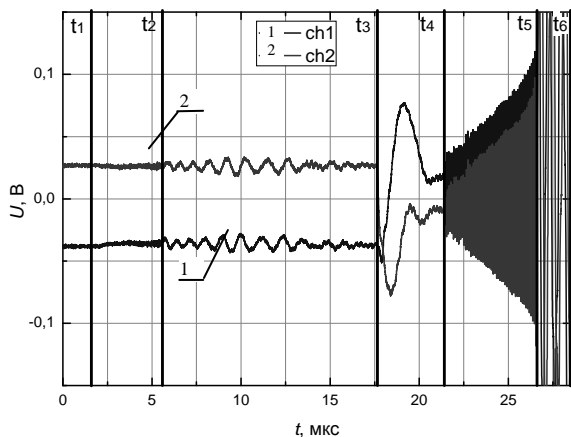


Рис. 2. Интерферограмма эксперимента в постановке ПДИ: t_1-t_2 – детонация АЗ; t_2-t_3 – УВ в преграде; t_3-t_4 – переходной процесс ударная волна-детонация в ПЗ; t_4-t_5 – детонация ПЗ; t_5-t_6 – ударная волна в основании

Таблица 1

Результаты опытов по определению времени задержки детонации и глубины ее возбуждения

Метод	Исследуемое ВВ	L , мм	P , ГПа	$\tau_{зад}$, мкс	$\tau_{риф}$, мкс	H , мм
БКЗ	ТАТЬ-октоген	3	18,8	0,12	0,11	2
		6	10,7	0,25	0,28	3
		9	7,1	0,43	0,46	4,6
		16	4,3	1,39	1,33	10,1
		19	3,8	–	1,74	12,7
		21	3,6	–	1,88	13,4
		23	3,3	–	2,44	17
	26	3,1	–	–	**	
	Октоген	6,5	9,9	0,21	0,22	2,2
		9,5	6,6	0,40	0,44	3,3
		12,5	5,2	0,72	0,77	5,5
		16	4,2	1,12	1,24	8,3
		20	3,7	1,74	1,80	11,5
		23	3,3	2,12	2,18	13,9
27		2,9	–	–	*	
31	2,6	–	–	**		
ПДИ	ТАТЬ-октоген	12,5	11,9	–	–	2,3
		34,5	6,2	–	–	5
		45	4,9	0,78	0,86	7,4
		48,6	4,4	1,13	1,20	9,7
		52,5	4	1,94	2,01	14,5
		54,6	3,7	3,17	2,87	19,4
	60	3	–	–	**	
	Октоген	15,5	10,1	–	–	0,8
		37,8	5,7	–	–	4
		51	4	1,56	1,63	11
		54	3,7	2,15	2,21	13,7
		57	3,3	3,80	3,82	23,6
		60	3	–	–	*
63		2,7	–	–	**	

* – в опытах детонация ПЗ не зарегистрирована, наблюдается ускорение ИУВ. Давление ИУВ в таких опытах принималось за пороговое давление инициирования;

** – в опытах детонация ПЗ не зарегистрирована, наблюдается затухание ИУВ.

По данным табл. 1 определены пороговые давления инициирования ВВ.

Полученные значения порогового давления инициирования ВВ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Пороговое давление инициирования ВВ, определенных методами БКЗ и ПДИ

ВВ	Пороговое давление инициирования, ГПа	
	БКЗ	ПДИ
ТАТБ-октоген	от $3,1 \pm 0,3$ до $3,3 \pm 0,3$	от $3 \pm 0,3$ до $3,7 \pm 0,4$
Октоген	$2,9 \pm 0,3$	$3 \pm 0,3$

Как видно из табл. 2, значения порогового давления инициирования ВВ ТАТБ-октоген и октоген, определенных методами БКЗ и ПДИ, совпадают в пределах погрешности определения давления ИУВ. Полученные результаты указывают на возможность использования сборок БКЗ для оценки порогового давления инициирования исследуемых ВВ.

Зависимость глубины возбуждения детонации от давления ИУВ

По данным табл.1 построены графики зависимости глубины возбуждения детонации в исследуемых ВВ (H) от давления на фронте ИУВ (P), которые представлены в логарифмических координатах на рис. 3 и рис. 4.

На рис. 3 изображены графики зависимости глубины возбуждения детонации в деталях из ВВ ТАТБ-октоген и октоген (H) от давления на фронте ИУВ (P) для метода БКЗ, а на рис. 4 – для метода ПДИ.

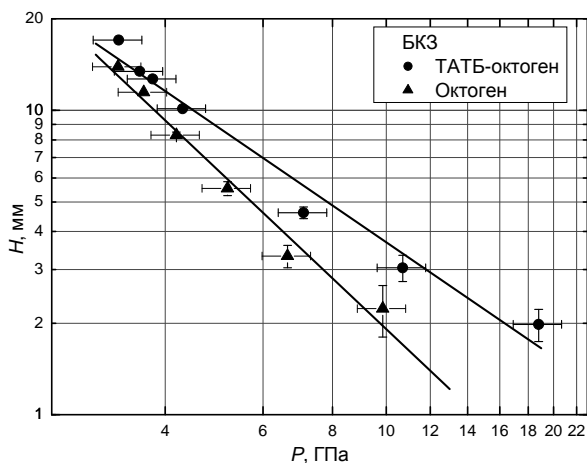


Рис. 3. Зависимости глубины возбуждения детонации в деталях $\varnothing 40$ из ВВ ТАТБ-октоген и октоген от давления на фронте ИУВ для метода БКЗ

Из рис. 3 видно, что зависимость глубины возбуждения детонации в ВВ ТАТБ-октоген от давления

в исследованном интервале давлений близка к подобным зависимостям для ВВ октоген. При этом в интервале давлений 3–5 ГПа значения глубины возбуждения детонации для ВВ октоген и ТАТБ-октоген совпадают в пределах погрешности эксперимента, что может свидетельствовать о ведущей роли октогена в процессе формирования детонационного режима в ВВ ТАТБ-октоген в данном интервале.

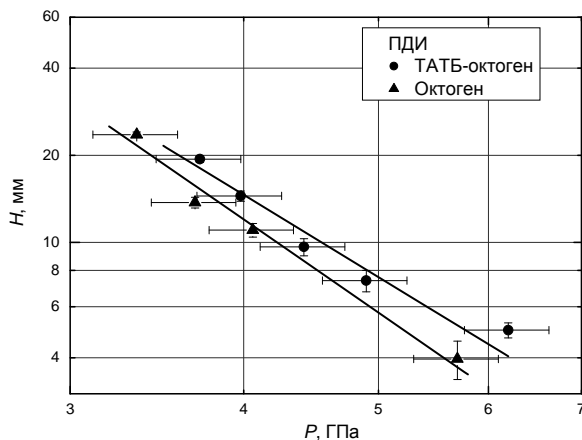


Рис. 4. Зависимости глубины возбуждения детонации в деталях $\varnothing 60$ из ВВ ТАТБ-октоген и октоген от давления на фронте ИУВ для метода ПДИ

Зависимости $H(P)$, приведенные на рис. 4, качественно не отличаются от зависимостей, приведенных на рис. 3. Однако они отличаются количественно.

Сравнение зависимостей $H(P)$, полученных с использованием методов БКЗ и ПДИ

На рис. 5 и рис. 6 проведено сопоставление зависимостей $H(P)$ в логарифмических координатах, полученных с использованием методов БКЗ и ПДИ, для ВВ ТАТБ-октоген и октоген соответственно.

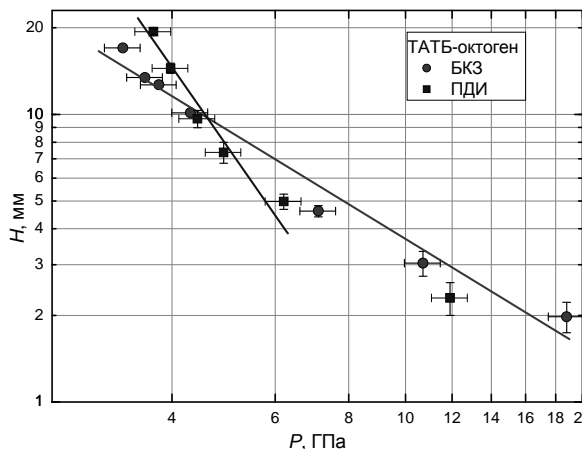


Рис. 5. Зависимости глубины возбуждения детонации в деталях из ВВ ТАТБ-октоген от давления на фронте ИУВ

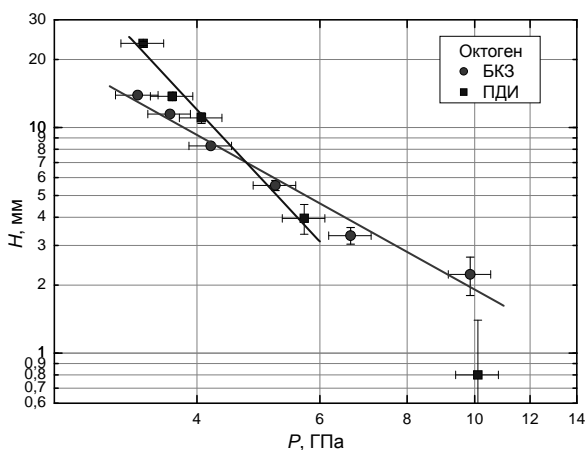


Рис. 6. Зависимости глубины возбуждения детонации в деталях из ВВ октогена от давления на фронте ИУВ

Из рис. 5 и рис. 6 видно, что имеется различие в характере зависимостей, полученных с использованием БКЗ и ПДИ, для исследованных ВВ на всем исследованном интервале давлений. В интервале давлений УВ от 3 до 5 ГПа значения глубины возбуждения детонации при инициировании ВВ АЗ $\varnothing 60 \times 30$ мм для исследованных ВВ превышают, значения глубины возбуждения детонации при инициировании ВВ АЗ $\varnothing 40 \times 7,1$ мм, а в интервале от 5 до 19 ГПа наблюдается обратная картина.

Кривизна фронта УВ

С помощью щелевого фотохронографа «Mks-UV» получены фотохронограммы выхода УВ на торец преграды из оргстекла различной толщины.

Схема опытов представлена на рис. 7.

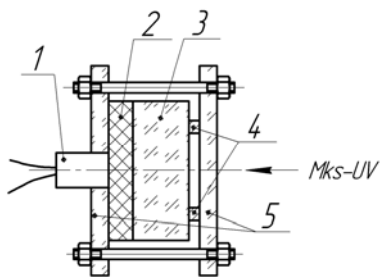


Рис. 7. Схема опытов по получению фотохронограмм выхода УВ на торец преграды из оргстекла: 1 – ЭД; 2 – АЗ из ВВ октоген; 3 – прокладка из органического стекла; 4 – отсечка; 5 – крышка и основание из органического стекла

Типичный пример фотохронограммы выхода УВ на торец преграды из оргстекла, зарегистрированной фотохронограмом «Mks-UV» в одном из опытов, представлен на рис. 8.

В результате обработки фотохронограмм выхода УВ определены радиусы кривизны в зависимости от толщины преграды из оргстекла по схеме описанной в [5].

Направление развертки – слева направо

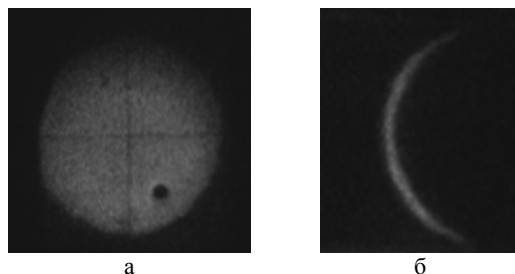


Рис. 8. Фотохронограмма выхода УВ на торец преграды из оргстекла, АЗ ВВ $\varnothing 60 \times 30$ мм, время развертки 20 мкс, масштаб 1:1 – предварительный снимок, б – рабочий

Использованная при определении скорость УВ найдена из D-u соотношений для оргстекла. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Радиус кривизны УВ

АЗ	Толщина прокладки оргстекла, мм	Радиус кривизны, мм
$\varnothing 40 \times 7,1$ мм	8	45
	16	52
	20	55
	25	78
$\varnothing 60 \times 30$ мм	19	148
	29	161
	43	188
	53	210

Как видно из табл. 3, радиус кривизны УВ, генерируемой АЗ $\varnothing 60 \times 30$ мм, практически во всем интервале исследуемых прокладок в 3 раза превышает радиус кривизны УВ, генерируемой АЗ $\varnothing 40 \times 7,1$ мм.

Численное моделирование

С целью установки причины отличия результатов экспериментов по исследованию УВЧ ВВ методами БКЗ и ПДИ проведено численное моделирование двух опытов с ВВ октоген (см. табл.1):

- метод БКЗ, толщина преграды из оргстекла 23 мм, давление входящей в пассивный заряд УВ – 3,3 ГПа;
- метод ПДИ, толщина преграды из оргстекла 57 мм, давление входящей в пассивный заряд УВ – 3,3 ГПа.

Из табл.1 видно, что, не смотря на существенные отличия в постановке этих экспериментов, оценки амплитуды падающей на ПЗ ВВ УВ, в обоих случаях дают одинаковые значения – 3,3 ГПа. При этом время задержки детонации и глубина ее возбуждения, определенные методом БКЗ, существенно (в ≈ 2 раза) меньше, чем в опытах ПДИ (см. табл. 1). Следует отметить, что при давлении, входящей в ПЗ УВ менее 5 ГПа, аналогичная ситуация наблюдается

и в экспериментах с ВВ ТАТЬ-октоген. Одной из причин данного расхождения может быть отличие спектра термодинамических состояний, реализующихся в ПЗ данных, полученных методами БКЗ и ПДИ, вследствие влияния волн разгрузки со свободных поверхностей экспериментальных сборок, имеющих разную геометрию. Для проверки этого предположения с помощью программного комплекса AUTODYN [6] проведены модельные расчеты, цель которых – качественно и количественно сравнить пространственно-временные распределения термодинамических величин в ПЗ методов БКЗ и ПДИ.

В экспериментах ПЗ ВВ в расчетах моделировался инертным веществом с соответствующими параметрами.

Параметры уравнения состояния Shock оргстекла и ВВ октоген представлены в табл. 4.

Расчеты проводились в двумерной постановке, в осесимметричном приближении на неподвижной прямоугольной сетке с помощью эйлерового решателя. Размер счетной ячейки в эйлеровой области составлял $0,1 \times 0,1$ мм. Схема постановки расчетов методов БКЗ и ПДИ представлены на рис. 9 и рис. 10 соответственно. В области ПЗ ВВ размещены датчики с шагом 5 мм.

На рис. 11 приведено сравнение расчетного профиля давления в центральной части ПЗ ВВ на момент выхода УВ на глубину 7,5 мм в методах БКЗ и ПДИ. Как видно из рис. 11, максимальное расчетное давление в методе ПДИ выше, чем в методе БКЗ. При этом градиент спада давления за фронтом УВ в методе ПДИ несколько больше по сравнению с методом БКЗ.

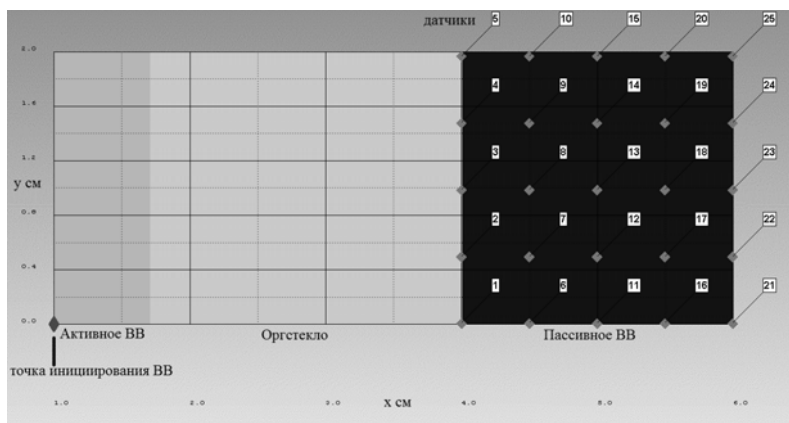


Рис. 9. Схема постановки расчетов метода БКЗ



Рис. 10. Схема постановки расчетов метода ПДИ

Таблица 4

Параметры оргстекла и пассивного ВВ

Вещество	$\rho_0, \text{г/см}^3$	Γ	$C_1 \text{ км/с}$	S_1
оргстекло	1,186	0,97	2,598	1,516
Пассивное ВВ	1,89	0	2,65	1,93

ρ_0 – начальная плотность; Γ – коэффициент Грюнайзена; C_1 и S_1 – параметры ударной адиабаты ($D-U$ соотношения)

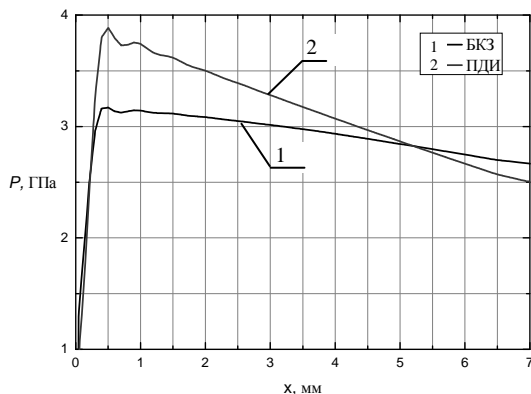


Рис. 11. Профили давления в центральной части пассивного ВВ на момент выхода УВ на глубину 7,5 мм

На рис. 12 приведено сравнение расчетного профиля давления в центральной части пассивного заряда ВВ на момент выхода УВ на глубину 15 мм в методах БКЗ и ПДИ. Как видно из рис. 12, максимальное расчетное давление в методе ПДИ незначительно больше, чем в методе БКЗ, при этом градиент спада давления в методе ПДИ заметно меньше по сравнению с методом БКЗ.

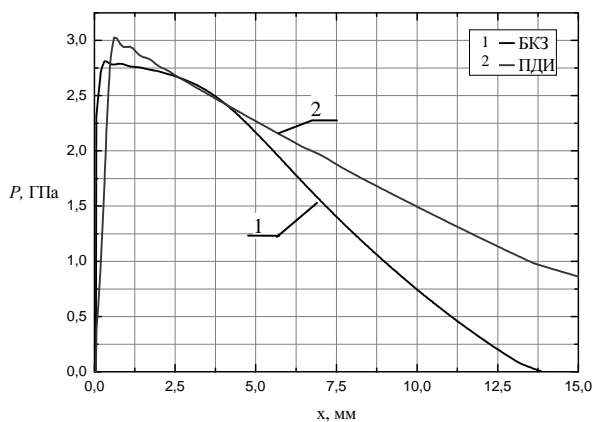


Рис. 12. Профиль давления в центральной части пассивного ВВ на момент выхода УВ на глубину 15 мм

На рис. 13 приведены расчетные диаграммы давления, полученные в датчиках № 1 (см. рис. 9 и рис. 10), расположенных на оси симметрии сборки, на стыке оргстекло – ПЗ ВВ.

Как видно из рис. 13, максимальное давление выше в расчетах, моделирующих эксперимент ПДИ, а градиент спада давления в методе ПДИ несколько больше по сравнению с методом БКЗ

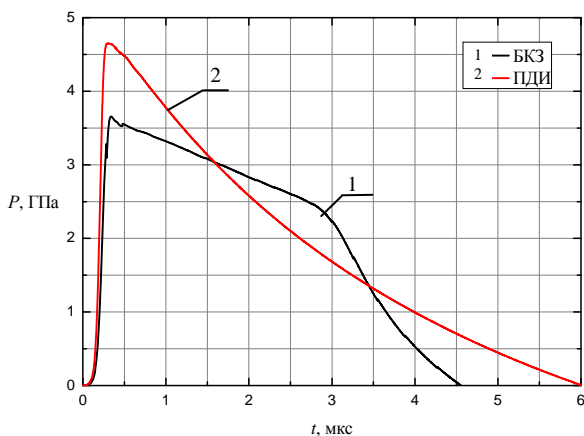


Рис. 13. Диаграммы давления, полученные в расчетах экспериментов БКЗ и ПДИ

Таким образом, по расчетам в рассматриваемых экспериментах время задержки и глубина возбуждения детонации, определенные методами БКЗ и ПДИ должны были либо совпасть, либо быть меньше в методе ПДИ, чем в БКЗ. То есть, по результатам

данной серии расчетов можно сделать вывод о том, что в соответствии с расчетом существенного улучшения условий для возбуждения детонации в ПЗ ВВ в постановке опыта ПДИ по сравнению с БКЗ не обеспечивается.

Данный вывод, основанный на результатах численного моделирования, противоречит экспериментальным результатам. В опытах время задержки детонации и глубина ее возбуждения, определенные методом БКЗ, существенно (в ≈ 2 раза) меньше, чем в опытах ПДИ.

Таким образом, предположение, объясняющее отличие результатов методов БКЗ и ПДИ влиянием только волн разгрузки на состояния в ПЗ ВВ, расчетно не подтверждается. Более того, результаты численного моделирования сами противоречат экспериментальным данным. Объяснить противоречие между результатами экспериментов и расчетов можно предположив, что в расчетах некорректно описывается затухание ударной волны в преграде из оргстекла. В работе [7] показано, что при распространении расходящейся и плоской ударных волн в экранах из оргстекла, затухание волны за фронтом немонотонно и имеет аномалии при давлениях $\sim 1,3$ ГПа и $\sim 5,0$ ГПа. Вследствие отсутствия соответствующего уравнения состояния оргстекла, в расчетах не имеется возможности адекватно описать отмеченные особенности поведения оргстекла. В экспериментах данные аномалии в совокупности с действием волн разгрузки могли существенно изменить картину течения и повлиять на процесс возбуждения детонации в экспериментах.

Заключение

Проведено исследование процессов возбуждения детонации ВВ ТАТБ-октоген и октоген расходящимися УВ с использованием методов БКЗ и ПДИ дополненных радиоинтерферометрической методикой.

Для исследованных ВВ получены зависимости глубины возбуждения детонации от давления во фронте ИУВ.

Расхождение в зависимостях глубины возбуждения детонации исследованных ВВ от давления ИУВ в исследованном интервале давлений (для БКЗ и ПДИ), вероятнее всего можно объяснить немонотонным затуханием УВ в преградах из оргстекла, которое в совокупности с действием волн разгрузки, оказывает влияние на процесс возбуждения детонации в экспериментах.

Пороговые давления инициирования исследуемых ВВ, полученные с использованием метода БКЗ и с метода ПДИ, близки между собой в пределах экспериментальной погрешности и составляют:

- ВВ ТАТБ-октоген от $(3,1 \pm 0,3)$ ГПа до $(3,3 \pm 0,3)$ ГПа;
- ВВ октоген $(2,9 \pm 0,3)$ ГПа.

Литература

1. Жерноклетов М. В. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.

2. Родионов А. В., Бельский В. М., Богданов Е. Н. и др. Определение глубины возбуждения детонации радиоволновым методом в пластифицированных октогене и ТАТБ. // Труды международной конференции «XI Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2009, С. 69–73.

3. Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А. Микроволновая диагностика ударноволновых и детонационных процессов. // Труды международной конференции «XIII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные

состояния вещества. Детонация. Ударные волны», РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2011, С. 785–794.

4. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко, Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.

5. Михайлов А. Л. Невозмущающие методы диагностики быстротекущих процессов. – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.

6. AUTODYN explicit software for Nonlinear Dynamics. Theory Manual revision 4.3. Century Dynamics Incorporated.

7. Кузьминский И. В. О влиянии фазовых превращений на фронте ударной волны в ПММА на темп затухания волны и ее структуру. // Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2005, С. 289–300.